

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-87-94



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОДПРУДНЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР И ВНУТРИЛЕДНИКОВЫХ ОАЗИСОВ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН В ЭПОХУ ДЕГРАДАЦИИ ВИСЛИНСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА

✉ Демидов В.Э.¹, Терехов А.В.¹

¹ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ vasdemidov@mail.ru

Анализ современного распределения подпрудных озер на Шпицбергене показывает, что они образуются в условиях, когда боковая ветвь ледника получает меньше питания и тает быстрее, чем основное тело ледника. Исходя из современных аналогий, в эпоху деградации вислинского ледникового покрова Шпицбергена подпрудные пресноводные озера образовывались в долинах, где два смежных ледниковых бассейна имели резкое различие в балансе массы из-за разницы в высоте, конфигурации долин или положении относительно источника осадков. Такое различие сегодня наблюдается в нескольких районах Шпицбергена. Так, на Земле Норденшельда отмечено не менее 4-х долин, где большие подпрудные озера могли образоваться во время дегляциации вислинского ледникового покрова и где озерные условия изменились на морские только после отступления подпруживающего ледника. Таким образом, озерные или ледниково-озерные (с добавлением обломочного материала из озерных айсбергов) отложения, вероятно, залегают под морскими фьордовыми осадками в нижних частях долин Грен, Гренфьорд, Сассен и Кьелстрём, а также в некоторых других долинах Земли Норденшельда. Часть известных валов в устьевых отрезках долин может являться остатками поздне-вислинских краевых морен подпруживающего ледника. В эпоху деградации вислинского оледенения одновременно должны были существовать многие десятки подпрудных озер и внутриледниковых оазисов, часть которых была значительно крупнее современных. Соответствующие осадки могут иметь датировки древнее дат полной дегляциации.

Ключевые слова: *деградация оледенения, последний ледниковый максимум, баланс массы ледников, озерные отложения, четвертичный период, валдайское оледенение*

Введение. Архипелаг Шпицберген характеризуется широким развитием сетчатого оледенения [*Гляциология Шпицбергена, 1985*]. С начала 20-го столетия рост ледников архипелага, характерный для малого ледникового периода, сменился деградацией [*Hanssen-Bauer et al., 2019; Farnsworth et al., 2020*]. Отступление ледников приводит к возникновению большого количества озер [*Ромашова и Чернов, 2023*]. В том числе зафиксировано появление 38 подпрудных (ice-dammed) озер, возникающих по сложной сети сливающихся ледниковых потоков [*Wieczorek, 2021; Wieczorek et al., 2023*].

Современная деградация ледников, очевидно, в основных чертах повторяет схожий процесс исчезновения поздневалдайского (вислинского) ледникового покрова архипелага. Ввиду этого изучение основных черт формирования современных подпрудных озер и свободных ото льда внутриледниковых участков может помочь в восстановлении палеогеографической обстановки завершающего этапа таяния позднеплейстоценового ледникового покрова Шпицбергена. Последний, представлявший собой сочетание малоподвижных покровов и быстро двигавшихся выводящих языков, приуроченных к системе фьордов архипелага [*Landvik et al., 2005*], начал отступать около 12,5 тыс. лет назад [*Mangerud et al., 1992*]. К 10,5 тыс. лет назад фьорды архипелага оказались свободны от ледника [*Farnsworth et al., 2020*].

Задача настоящей работы - выявить основные черты формирования современных подпрудных озер Шпицбергена и обозначить участки, где аналогичный процесс был наиболее вероятен в процессе деградации вислинского ледникового покрова архипелага.

Материалы и методы. Анализ расположения современных подпрудных озер и условий для их образования проведен на основе мозаики аэрофотоснимков и спутниковых

изображений Норвежского полярного института (<https://toposvalbard.npolar.no>) с привлечением серий аэрофотоснимков 1936-1938 гг., 2008-2012 (Норвежский полярный институт) и собственных наблюдений за полевые сезоны 2017-2024 гг.

Результаты и обсуждение. Исходя из анализа положения подпрудных (ice-dammed) озер и динамики их появления между 1936-1938 гг. и 2008-2012 гг. выявлен наиболее характерный для сетчатых систем Шпицбергена тип озер на слиянии ледников. Возникают данные озера в случаях, когда опережающая деградация (абляция) бокового ледникового потока приводит к отрыву его края от борта основного ледника и заполнения образовавшегося пространства талыми водами либо моренным полем - «оазисом» (рис. 1).

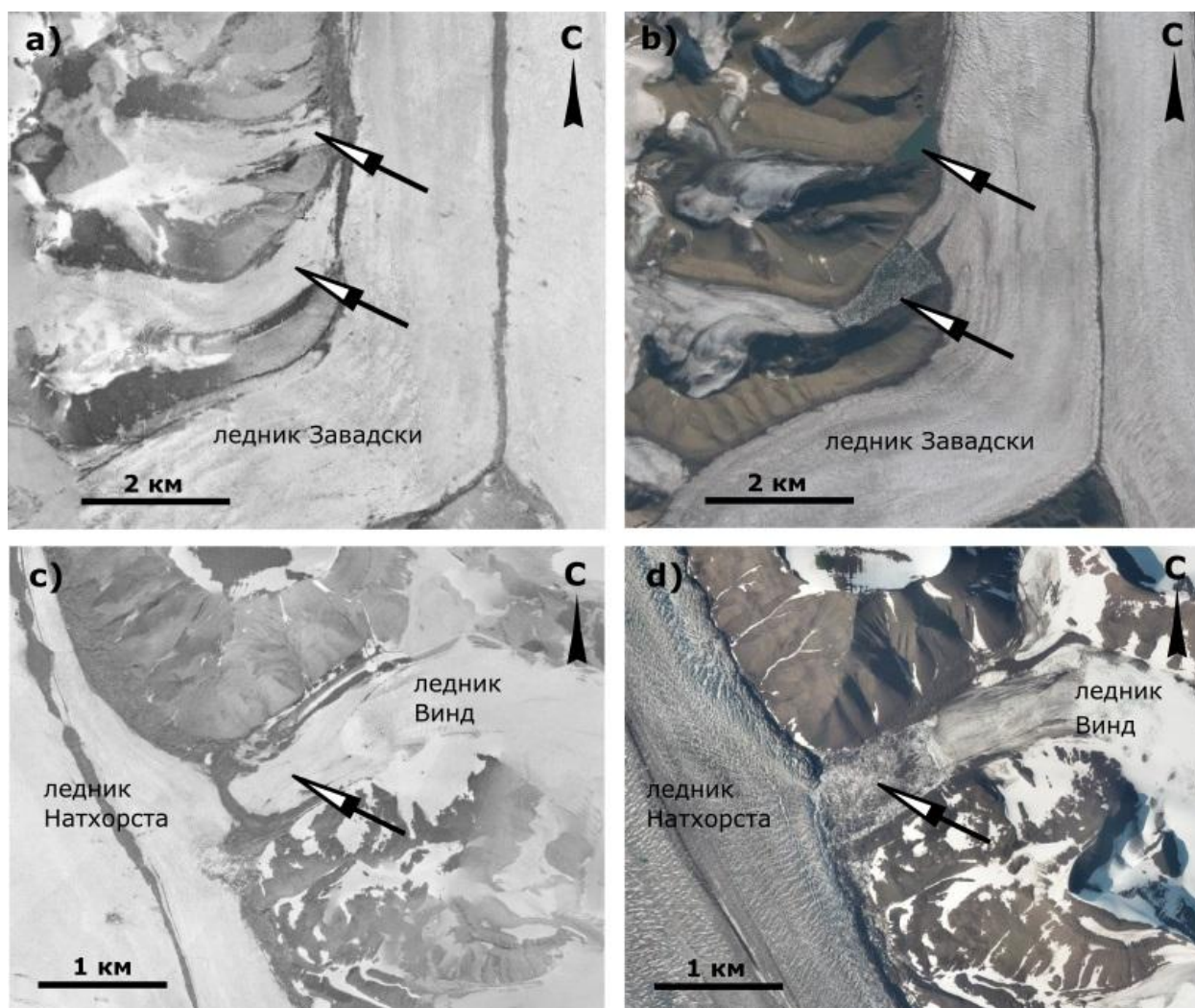


Рис. 1. Примеры формирования подпрудных озер на архипелаге Шпицберген в современных условиях (Земля Веделя-Ярлсберга): а) аэрофотоснимок 1936 г. на ледник Завадски; б) спутниковый снимок 2020 г. на ледник Завадски; в) аэрофотоснимок 1936 г. на ледник Натхорста; д) спутниковый снимок 2020 г. на ледник Натхорста. Стрелками обозначены участки возникновения подпрудных озер и моренных полей («оазисов») в результате опережающего отступления боковых ветвей ледника. Изображения предоставлены ресурсом [Toposvalbard.npolar.no](https://toposvalbard.npolar.no) Норвежского полярного института.

Опережающая деградация, очевидно, связана с резким различием в объеме питания сливающихся ледниковых потоков. Различие обусловлено, с одной стороны, локальными особенностями конфигурации сетчатой системы ледников - диспропорцией между потоком с обширного ледникового плато и боковым притоком из небольшой долины или разницей в абсолютных высотах области питания. С другой стороны, влияние оказывают региональные климатические и орографические особенности разных участков архипелага,

для которого весьма характерны неравномерность высотного положения снеговой линии и в целом распределения ледниковых покровов [Троицкий и др., 1975; Гляциология Шпицбергена, 1985]. Значимым фактором является также диспропорция в длине долин сливающихся ледников, поскольку даже в условиях равенства в объемах питания различие в объеме льда, необходимого для заполнения короткой и протяженной долин неизбежно приведет к появлению свободного ото льда пространства в точке слияния.

При деградации вислинского ледникового покрова подпрудные озера неизбежно должны были появляться на участках с опережающей деградацией ответвлений ледника. Условия их возникновения достаточно надежно восстанавливаются путем анализа современного положения районов архипелага, где крупные ледниковые системы соседствуют с обширными свободными ото льда пространствами. В частности в районе российского поселка Баренцбург наблюдается связанная с орографическим перехватом влажных атлантических воздушных масс [Hanssen-Bauer et al., 2019] диспропорция площадей ледников между хребтами западного побережья (ледники Альдегонда, Веринг, Западный и Восточный Гренфьорд и др.) и хребтами к востоку от залива Гренфьорд в центре Земли Норденшельда (где крупные ледники отсутствуют). При сохранении основной черты атмосферной циркуляции - западного и юго-западного переноса осадков, скорость отступления ледника в долине Грен (длина которой весьма значительна) на рубеже плейстоцена и голоцена должна была опередить деградацию ледникового потока, двигавшегося по дну современного залива Гренфьорд на север до впадения в ледниковый поток залива Исфьорд. В результате в низовьях долины Грен должно было возникнуть крупное подпрудное озеро и/или свободное от льда моренное поле (рис. 2). Данная обстановка сохранялась вплоть до полного отступления подпруживающего ледника, после чего в тектонических условиях раннего голоцена на ранних этапах гляциоизостазийного воздымания [Bondevik et al., 1995; Forman et al., 2004] долина Грен была заполнена морскими водами.

Другим примером появления подпрудных озер может служить долина Кьелстрём. Эта долина открывается устьем во фьорд Ван-Майн, причем длина долины превышает отрезок фьорда от ее устья до кутовой части (бухта Риндерс). В кутовой части во фьорд выходит язык крупного ледника Паула, область питания которого значительно превышает область питания ледников в бортах д. Кьелстрём. Такая конфигурация долин, фьорда и ледника приводит к тому, что любая подвижка ледника Паула перекрывает выход из долины Кьелстрём, чему свидетельство перегораживающая устье долины морская морена Damesmorenen, возраст которой оценивается между 600 и 250 лет назад [Rowan et al., 1982]. Деградация ледника во фьорде Ван-Майн и бухте Риндерс на рубеже плейстоцена и голоцена должна была характеризоваться соответственным опережающим таянием в д. Кьелстрём и появлению здесь подпрудного озера.

Учитывая, что в настоящий момент подпрудных озер насчитывается 38 [Wieczorek, 2021; Wieczorek et al., 2023], в эпоху таяния вислинского оледенения, более обширного чем современное, одновременно должны были существовать многие десятки подпрудных озер, часть которых была значительно крупнее современных. Анализ конфигурации долин Земли Норденшельда и распределения современных ледников в центральной части о. Западный Шпицберген позволяет заключить, что наиболее вероятные участки возникновения крупных подпрудных озер и моренных оазисов в период таяния вислинского ледникового покрова это долины Грен, Гренфьорд, Кьелстрём, Сассен (рис. 3).

До настоящей работы возможность наличия озерных осадков рубежа плейстоцена и голоцена в устьевых частях долин Шпицбергена в целом и Земли Нордешельда в частности не обсуждалась. Предполагается, что долины заполнены преимущественно морскими дельтовыми (Gilbert-type delta) отложениями [Gilbert, 2018]. Существование позднеплейстоценовых подпрудных озер позволяет объяснить наличие пресных сегрегационных льдов в толщах алевролитов с крупнообломочными дробстоунами

(осадки подпрудного озера с айсбергами), обнаруженных в нижней и средней части долины Холлендар [Demidov et al., 2024]. Также появляется возможность предложить альтернативную трактовку возраста валов, которые наблюдаются в нижних частях некоторых долин Земли Норденшельда, а частности Рейндален [Гляциология Шпицбергена, 1985], Густавдален [Larsen et al., 2018], Вассдален [Семевский, Шкатов, 1965] Стенброхульт (л. Альдегонда) и некоторых других. Такие валы могут являться остатками поздне-вислинских краевых морен подпруживающего ледника. Существование поздне-вислинских внутриледниковых оазисов может также объяснять удревание радиоуглеродных датировок, имеющее место в ряде разрезов [см. например Соловьева и др., 2018].



Рис. 2. Предполагаемое распространение крупных подпрудных озер и прилегающих внутриледниковых оазисов (моренных полей) в эпоху деградации вислинского ледникового щита в районе долины р. Грен. Голубым цветом отмечены участки наиболее вероятного появления подпрудных озер и прилегающих оазисов. Белая штриховая линия отмечает предполагаемый контур выводных ледниковых потоков исходя из мощности современных питающих ледников. Красным цветом показаны краевые морены малого ледникового периода. Спутниковая мозаика предоставлена ресурсом Toposvalbard.npolar.no Норвежского полярного института.

Заключение

Исходя из современных аналогий, в эпоху деградации вислинского ледникового покрова Шпицбергена подпрудные пресноводные озера образовывались в долинах, где два смежных ледниковых бассейна имели резкое различие в балансе массы из-за разницы в высоте, конфигурации долин или положении относительно источника осадков. Такое различие сегодня наблюдается в нескольких районах Шпицбергена. Так, на Земле Норденшельда отмечено не менее 4-х долин, где большие подпрудные озера могли образоваться во время дегляциации вислинского ледникового покрова и где озерные

условия изменились на морские только после отступления подпруживающего ледника. Озерные или ледниково-озерные (с добавлением обломочного материала из озерных айсбергов) отложения, вероятно, залегают под морскими фьордовыми осадками в нижних частях долин Грен, Гренфьорд, Сассен и Кьелстрём, а также в некоторых других долинах Земли Норденшельда. Часть валов в устьевых отрезках долин может являться остатками поздне-вислинских краевых морен подпруживающего ледника. В эпоху таяния вислинского оледенения одновременно должны были существовать многие десятки подпрудных озер и внутрiledниковых оазисов, часть которых была значительно крупнее современных. Соответствующие осадки могут иметь датировки древнее дат полной дегляциации.

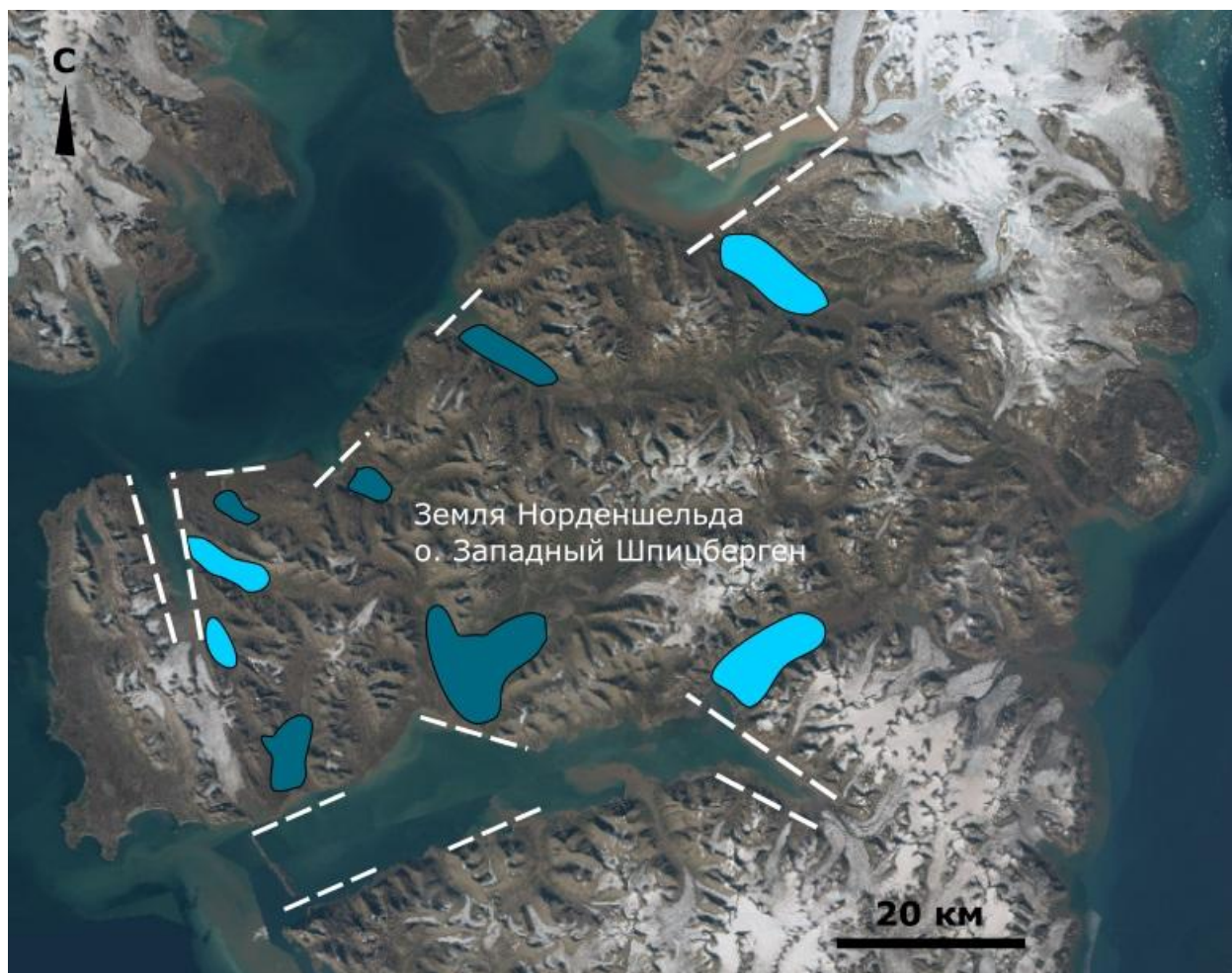


Рис. 3. Предполагаемое распространение крупных подпрудных озер и прилегающих внутрiledниковых оазисов (моренных полей) в эпоху деградации вислинского ледникового щита. Голубым цветом отмечены участки наиболее вероятного появления подпрудных озер и прилегающих оазисов. Синим цветом отмечены участки с меньшей вероятностью появления подпрудных озер и прилегающих оазисов. Белая штриховая линия отмечает контур подпруживающего выводного ледника. Спутниковая мозаика предоставлена ресурсом Torosvalbard.polar.no Норвежского полярного института.

ЛИТЕРАТУРА

- Гляциология Шпицбергена. Под ред. Котлякова В.М., Наука. 1985. 200 с.
- Ромашова К.В., Чернов Р.А. Методика инвентаризации приледниковых озер архипелага Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. №2. С. 157-170. doi:10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170
- Семевский Д.В., Шкатов Е.П. Геоморфология Земли Норденшельда (Западный Шпицберген) // Материалы по геологии Шпицбергена. Л. 1965. С. 232-240.

Соловьева Д.А., Савельева Л.А., Веркулич С.Р., Зазовская Э.П. Последледниковые изменения природной среды в районе поселка Баренцбург (остров Западный Шпицберген) // «Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. St. Petersburg, Russia, 17–19 May 2018» / ред. Попов С.В., Гаврилкина С.А., Прягина Г.В. - Санкт-Петербург, 2018. С. 213-222.

Троицкий Л.С., Зингер Е.М., Корякин В.С., Маркин В.А., Михалев В.И. Оледенение Шпицбергена (Свальбарда). 1975. М., Наука. 276 с.

Bondevik, S., Mangerud, J., Salvigsen, O. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard // Polar Research. 1995. Vol. 14. Is. 2. P. 153-180. doi:10.3402/polar.v14i2.6661.

Farnsworth, W.R., Allaart, L. et al. Holocene glacial history of Svalbard: Status, perspectives and challenges // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 208. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103249

Forman S.L., Lubinski D., Ingólfsson O., Zeeberg J.J., Snyder J.A., Siegert M., Matishov G. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. Is. 11–13. P. 1391-1434. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.007

Gilbert L.G. Cryostratigraphy and sedimentology of high-Arctic fjord valleys. PhD Thesis. University of Bergen, 2018. P. 1-28.

Hanssen-Bauer I., Førland E., Hisdal H., Mayer S., Sandø A., Sorteberg A., Adakudlu M., Andresen J., Bakke J., Beldring S., Benestad R., van der Bilt W., Bogen J., Borstad Ch., Breili K., Breivik O., Børsheim K., Christiansen H., Dobler A., Wong W. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. NCCS report. 2019. no. 1. 208 p. doi:10.13140/RG.2.2.10183.75687.

Landvik J., Ingólfsson Ó., Mienert J., Lehman S., Solheim A., Elverhøi A., Ottesen D. Rethinking Late Weichselian ice sheet dynamics in coastal NW Svalbard // Boreas. 2005. Vol. 34. P. 7-24. doi:10.1080/03009480510012809

Larsen E. et al. Lateglacial and Holocene glacier activity in the Van Mijenfjorden area, western Svalbard // Arktos. 2018. Vol. 4. Is. 1. P. 1–21. doi:10.1007/s41063-018-0042-2

Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A., Helliksen D., Landvik J.Y., Lønne I., Lycke A.K., Salvigsen O., Sandahl T., Svendsen J.I. The Last Glacial Maximum on Spitsbergen, Svalbard // Quaternary Research. 1992. Vol. 38. Is. 1. P. 1–31. doi: 10.1016/0033-5894(92)90027-G

Rowan D.E., Péwé T.L., Péwé R.H., Stuckenrath R. Holocene Glacial Geology of the Svea Lowland, Spitsbergen, Svalbard // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 1982. Vol. 64. Is. 1–2. P. 35–51. doi:10.1080/04353676.1982.11880055

Wieczorek I. Modern classification of Glacial Lakes Systems on Svalbard // The 7th annual: Students in Polar and Alpine Research Conference – SPARC 2021At: BrnoAffiliation: University of Wroclaw. 2021. doi:10.13140/RG.2.2.29816.87041.

Wieczorek I., Strzelecki M.C., Stachnik Ł., Yde J.C., Malecki J. Post-Little Ice Age glacial lake evolution in Svalbard: inventory of lake changes and lake types // Journal of Glaciology. 2023. Vol. 69(277). P. 1449-1465. doi:10.1017/jog.2023.34

DISTRIBUTION OF LATE PLEISTOCENE ICE-DAMMED LAKES AND ICE-FREE OASES ON SVALBARD

Demidov V.E.¹, Terekhov A.V.¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

The analysis of the present-day distribution of ice-dammed lakes on Svalbard shows that they often form when a glacier branch receives less accumulation and melts faster than the main glacier body. This pattern should have been repeated during the degradation of the Weichselian ice sheet. Ice-

dammed freshwater lakes would form in valleys where two adjoining glaciation basins had a sharp difference in the mass balance due to differences in height, valley configuration or position relative to the precipitation source. Such difference today is observed in several regions of Svalbard and there are at least 4 valleys in Nordenskjold land where large ice-dammed lakes and “wet-valley” oases must have been formed during the deglaciation of the Late Weichselian ice sheet and where lacustrine conditions changed to marine only after the damming glacier retreat. Thus lacustrine or glacio-lacustrine sediments (with the addition of clastic materials from lake icebergs) should underlay marine fjord deltaic strata in lower Grondalen, Gronfjorddalen, Sassendalen and Kjellstromdalen as well as few other valleys of Nordenskjold land. Some of the ridges in lower parts of Svalbard valleys may represent Late Weichselian marginal moraines of the damming glaciers. During the melting of the Weichselian glaciation many dozens of dammed lakes must have existed simultaneously, some of which were significantly larger than the modern ones. Corresponding deposits of lakes and oases will have carbon dates exceeding full deglaciation.

Keywords: *glacier degradation, last glacial maximum, glacial mass balance, lacustrine sediments, Quaternary, Weichselian glaciation*

REFERENCES:

- Glaciology of Spitsbergen. ed. Kotlyakov V.M., Nauka. 1985. 200 p.
- Romashova K.V., Chernov R.A. Inventory methodology of periglacial lakes in Spitzbergen (Svalbard) // Arctic and Antarctic Research. 2023. Vol. 69. Is. 2. P. 157-170. (in Russ.) doi: 10.30758/0555-2648-2023-69-2-157-170
- Semevsky D.V., Shkatov E.P. Geomorfologiya Zemli Nordenshelda (Zapadny Shpitsbergen) // Materialy po geologii Shpitsbergena. L. 1965. P. 232-240
- Soloveva D.A., Savelieva L.A., Verkulich S.R., Zazovskaya E.P. Poslelednikovyye izmeneniya prirodnoy sredy v rayone poselka Barentsburg (ostrov Zapadny Shpitsbergen) // «Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. St. Petersburg, Russia, 17–19 May 2018» / ed. Popov S.V., Gavrilkina S.A., Pryakhina G.V. Saint-Petersburg, 2018. P. 213-222.
- Troitski L.S., Zinger E.M., Koryakin V.S., Markin V.A., Mikhalev V.I. Oledenenie Shpitsbergena (Svalbarda). M. Nauka. 1975. 276 p.
- Bondevik, S., Mangerud, J., Salvigsen, O. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard // Polar Research. 1995. Vol. 14. Is. 2. P. 153-180. doi:10.3402/polar.v14i2.6661.
- Farnsworth, W.R., Allaart, L. et al. Holocene glacial history of Svalbard: Status, perspectives and challenges // Earth-Science Reviews. 2020. Vol. 208. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103249
- Forman S.L., Lubinski D., Ingólfsson O., Zeeberg J.J., Snyder J.A., Siegert M., Matishov G. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. Is. 11–13. P. 1391-1434. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.007
- Gilbert L.G. Cryostratigraphy and sedimentology of high-Arctic fjord valleys. PhD Thesis. University of Bergen, 2018. P. 1-28.
- Hanssen-Bauer I., Førlund E., Hisdal H., Mayer S., Sandø A., Sorteberg A., Adakudlu M., Andresen J., Bakke J., Beldring S., Benestad R., van der Bilt W., Bogen J., Borstad Ch., Breili K., Breivik O., Børsheim K., Christiansen H., Dobler A., Wong W. Climate in Svalbard 2100 - a knowledge base for climate adaptation. NCCS report. 2019. no. 1. 208 p. doi:10.13140/RG.2.2.10183.75687.
- Landvik J., Ingólfsson Ó., Mienert J., Lehman S., Solheim A., Elverhøi A., Ottesen D. Rethinking Late Weichselian ice sheet dynamics in coastal NW Svalbard // Boreas. 2005. Vol. 34. P. 7-24. doi:10.1080/03009480510012809
- Larsen E. et al. Lateglacial and Holocene glacier activity in the Van Mijenfjorden area, western Svalbard // Arktos. 2018. Vol. 4. Is. 1. P. 1–21. doi:10.1007/s41063-018-0042-2
- Mangerud J., Bolstad M., Elgersma A., Helliksen D., Landvik J.Y., Lønne I., Lycke A.K., Salvigsen O., Sandahl T., Svendsen J.I. The Last Glacial Maximum on Spitsbergen, Svalbard // Quaternary Research. 1992. Vol. 38. Is. 1. P. 1–31. doi: 10.1016/0033-5894(92)90027-G
- Rowan D.E., Péwé T.L., Péwé R.H., Stuckenrath R. Holocene Glacial Geology of the Svea Lowland, Spitsbergen, Svalbard // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 1982. Vol. 64. Is. 1–2. P. 35–51. doi:10.1080/04353676.1982.11880055

Wieczorek I. Modern classification of Glacial Lakes Systems on Svalbard // The 7th annual: Students in Polar and Alpine Research Conference – SPARC 2021At: BrnoAffiliation: University of Wroclaw. 2021. doi:10.13140/RG.2.2.29816.87041.

Wieczorek I., Strzelecki M.C., Stachnik Ł., Yde J.C., Malecki J. Post-Little Ice Age glacial lake evolution in Svalbard: inventory of lake changes and lake types // Journal of Glaciology. 2023. Vol. 69(277). P. 1449-1465. doi:10.1017/jog.2023.34